

УДК 621.002.3:621.89

Т.А. Роїк, В.В. Холявко, О.С. Луференко

ВПЛИВ ЛЕГУВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ І ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПІДШИПНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ВІДХОДІВ СТАЛІ 11РЗМЗФ2. ЧАСТИНА 1. ТЕХНОЛОГІЧНІ ФАКТОРИ ОДЕРЖАННЯ МАТЕРІАЛІВ І ЇХ ВПЛИВ НА СТРУКТУРУ**Вступ**

Більшість сучасних машин і механізмів мають рухомі тертьові зчленування, які працюють у різних умовах та забезпечують можливість виконання ними робочих функцій, пов'язаних із пересуванням, підйомом вантажів, механічною та термічною обробкою матеріалів, ковзними ущільненнями тощо. Для задоволення експлуатаційних вимог розроблено і використовується ряд підшипникових литих матеріалів на основі чорних і кольорових металів (бронзи, бабіту та ін.) і композиційних матеріалів, виготовлених методами порошкової металургії [1, 2]. Проте у зв'язку з безперервно зростаючими параметрами роботи машин і механізмів у більшості випадків деталі, що працюють у вузлах тертя, зокрема підшипники ковзання, виходять з ладу значно раніше, ніж інші частини машин. Це змушує проводити роботи з ремонту устаткування і виготовляти велику кількість запасних частин, що пов'язано з втратами часу і засобів.

Серед існуючих підшипникових матеріалів особливе місце посідають такі, що функціонують у важких умовах експлуатації — при високих швидкостях ковзання, підвищених та високих температурах, тисках, в агресивному середовищі. Так, для жорстких умов роботи підшипникових матеріалів на повітрі при температурі 500–600 °С і підвищених навантаженнях (до 8 МПа) зазвичай використовуються матеріали на основі заліза, оскільки інші матеріали, насамперед на основі кольорових металів, показують або незадовільні триботехнічні властивості, або є непрацездатними за таких умов роботи. До того ж, ряд матеріалів значно підвищує вартість вузла тертя і механізму загалом [1–4].

Поряд з цим існуючі на сьогодні матеріали на основі заліза для важких умов роботи не

задовольняють зростаючі потреби сучасної техніки, а саме литі матеріали в ряді випадків мають недостатні показники експлуатаційних властивостей (високий коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування) або є взагалі непрацеспроможними, а порошкові, хоч і мають істотні переваги перед литими, відрізняються високою вартістю, пов'язаною насамперед з високою вартістю вихідної сировини (порошків) [1, 2].

Водночас в Україні існують великі потенційні джерела дешевої цінної сировини — шліфувальні відходи кольорових і чорних металів та сплавів машинобудівного, металургійного, приладобудівного виробництва, які вивозяться у відвали внаслідок їх забруднення абразивом і не використовуються в повторному циклі виробництва. Втім, зазначені відходи, що містять у своєму складі велику кількість цінних легувальних елементів (W, Mo, V, Co, Al, Ti, Cr, Nb та ін.), після відповідної переробки можна використовувати в подальшому виробничому циклі, зокрема для виготовлення ефективних підшипників ковзання, як це було започатковано в працях [2–4].

У зв'язку з цим розвиток наукових аспектів розробки технологічних заходів на всьому замкненому ланцюгу одержання високоякісних високотемпературних підшипникових матеріалів та готових виробів з них, коли кожний етап виготовлення матеріалів впливає на формування остаточної структури і якісно нового рівня функціональних властивостей, є надзвичайно важливим як з наукової, так і з практичної точки зору.

Отже, питання створення нових композиційних підшипникових матеріалів, які спроможні показувати високі експлуатаційні властивості в жорстких умовах роботи, зокрема на основі заліза, та при цьому виготовлені з дешевої і цінної сировини, уявляються дуже актуальними і потребують виконання глибоких досліджень, особливо в умовах пошуку доступних видів сировини і реалізації завдань розробки ресурсозберігаючих технологій.

Постановка задачі

Аналіз процесів, що відбуваються під час тертя, показує, що темп зношування поверхонь тертя (підшипника і вала) виділяється серед інших факторів властивостями вторинних структур і значною мірою залежить від характеру утворених розділювальних антизадирних

плівок (вторинних структур) [1, 2]. Вторинні структури, що утворюються на контактних поверхнях у процесі тертя, можуть відігравати як позитивну роль — мінімізувати сили тертя і запобігати зчепленню підшипника і вала, так і негативну роль, коли плівка тертя, що виникає при роботі контактної пари, утворюється пухкою, крихкою і сама виступає як абразив. При цьому в процесі формування плівок тертя, що здатні забезпечити тривалу і надійну роботу підшипнику, значущою виявляється не окрема властивість матеріалу, а весь їх комплекс — твердість, міцність, пластичність матеріалу, які, у свою чергу, залежать від наявності в матеріалі тих чи інших легувальних елементів, здатних утворити таку структуру, яка забезпечить утворення стабільних антизадирних плівок та надасть підшипнику необхідного рівня функціональних властивостей.

Тому метою даної статті є встановлення впливу легувальних елементів на формування структури і властивостей композиційних підшипникових матеріалів на основі шліфувальних відходів сталі 11P3M3Φ2 з домішками твердої змащувальної речовини — фториду кальцію CaF_2 .

У частині 1 мається на меті проілюструвати вплив технологічних операцій виготовлення та їх параметрів на формування структури композиційних підшипникових матеріалів на основі сталі 11P3M3Φ2 при наявності твердого мастила CaF_2 .

Результати досліджень і їх аналіз

Нами як основу підшипникового матеріалу для жорстких умов експлуатації було обрано порошкові шліфувальні відходи інструментальної швидкорізальної сталі 11P3M3Φ2 (відходи Львівського і Полтавського інструментальних заводів). Причин для цього кілька. Вказана сталь належить до класу теплостійких сталей [5]. Вона до температур 500–600 °C зберігає досить високі міцнісні властивості, має високу окалинотійкість, що зумовлено передусім наявністю низки легувальних елементів (таблиця).

Відходи сталі 11P3M3Φ2 утворюються на операціях шліфування ріжучого інструменту і внаслідок забруднення абразивною крихтою від шліфувальних кругів не використовуються в подальшому циклі виробництва. Проте вказана сталь містить у своєму складі цінні легувальні елементи (див. таблицю), що зробило її приваб-

ливою для використання як основи саме високотемпературного підшипникового матеріалу.

Таблиця. Хімічний склад сталі 11P3M3Φ2

Елементи	Масова частка елементів, %
C	1,02–1,12
Si	0,3–0,5
Mn	0,3–0,5
Mo	2,5–3,0
Cr	3,8–4,3
W	2,5–3,3
V	2,3–2,7
Fe	Решта

Для очищення відходів сталей від абразиву застосовувалась методика магнітної сепарації [6] з використанням магнітного сепаратора, розробленого в ІПМ ім. І.М. Францевича НАН України. Залишок абразивної крихти після очищення металевих порошоків-відходів становить 1–2 %.

Частинки сталі мають вигляд мікроструктур розмірами 0,05–0,15 мм, що видно з рис.1.



Рис. 1. Частинки порошоків-відходів сталі 11P3M3Φ2 після очищення, $\times 200$

Після очищення металевих порошоків від абразиву вони піддавались відновлювальному відпалу при температурах 870–1000 °C в середовищі водню з метою видалення надлишкового кисню — оксидів заліза та легувальних елементів. Вміст кисню в порошках-відходах сталі 11P3M3Φ2 до відпалу становить 0,8–1,0 %, що негативно позначається на структурі та механічних властивостях матеріалів, зокрема знижується пластичність [7, 8]. Крім того, підвищена кількість кисню вимагає збільшення навантажень при пресуванні для досягнення належної щільності брикетів, а також збільшує знос

прес-форм. Відновлювальний відпал знижує загальну концентрацію кисню в порошках до 0,4 %, що сприяє одержанню однорідної мікроструктури, а саме — у зразках з невідпалених порошків спостерігаються сліди біографічного характеру — залишки литої структури у вигляді зернограничних виділень карбідів. Проте після відновлювального відпалу карбіди заліза і легувальних елементів сфероїдизуються, зростає міцність матеріалу [7, 8].

Після відновлювального відпалу конгломерати розмелювались на дробильній машині ЛДМ-150 та визначався гранулометричний склад. Використовувані надалі порошки стали мали розміри частинок 125–160 мкм.

Для важких умов роботи пари тертя, коли серед інших навантажувальних факторів спостерігається вплив високих температур навколишнього середовища (до 600 °C) і ніяке рідке мастило непрацездатне, особливо важливо захистити поверхні тертя від посиленого зносу та тужавіння. Для цього використовують домішки, які виконують роль твердого або сухого мастила.

Використання тієї чи іншої речовини визначається матеріалом сполучених поверхонь, умовами тертя, фізико-механічними і хімічними властивостями речовин, їх термічною стабільністю по відношенню до навколишнього середовища, взаємодією з матеріалами пари тертя. На сьогодні досліджено та описано більше 100 речовин [9, 10], що застосовуються як тверді мастила.

Функціонування матеріалу у важких режимах тертя супроводжується інтенсивною деформацією шарів порошкоподібних мастил та тертьового шару металу, а також підвищенням температури. Як результат цього, зростає швидкість хімічних реакцій і дифузійних процесів у матеріалах пари тертя та їх взаємодія з твердими мастилами. Утворюються хімічно модифіковані тонкі поверхневі шари, що забезпечують масильну дію при важких режимах. Склад шарів визначається складом матеріалу тертьової пари, мастила та середовища, в якому відбувається тертя.

Численність рекомендованих антизадирних домішок, про що було згадано вище, пояснюється різноманітністю умов роботи підшипників, в результаті чого постійно проводяться роботи з пошуку антифрикційних домішок, які дають найбільший ефект саме для даних конкретних умов. Асортимент речовин, що залучаються для таких цілей, пояснюється відсутністю тео-

ретичних основ процесу тертя та глибоких уявлень про роль введених домішок, що не дає можливості більш раціонально вибирати матеріали присадок та визначати їх оптимальну кількість. Проте дослідження праць [9–11] та результати аналізу літературних джерел з даної проблематики переконливо показали перспективність використання фториду кальцію як твердого мастила саме для екстремальних умов роботи (високі температури, навантаження, агресивне середовище — повітря).

Враховуючи досить високу термічну та хімічну стабільність CaF_2 [1, 12], можна припустити, що у важких та надважких умовах роботи підшипникові матеріали з присадками фториду кальцію будуть відповідати вимогам антифрикційності. Масову кількість CaF_2 було вибрано в межах 4–8 % з таких причин [12–15]: при вмісті CaF_2 менше 4 % не повною мірою виконуються функції твердого мастила, а при вмісті більше 10 % значно знижуються характеристики міцності та пластичності матеріалу.

Таким чином, після проведення підготовчих операцій з очищення шламових відходів сталей (регенерації), відповідної підготовки порошків твердого мастила CaF_2 (просушки протягом однієї години при 120 °C та просіювання фракцій до 125 мкм) здійснювались виготовлення вихідної шихти.

Компоненти шихти — відходи сталі 11РЗМЗФ2 та порошки CaF_2 — змішувались у банковому змішувачі протягом чотирьох годин та піддавались пресуванню при тисках 700–900 МПа. У результаті пресування композиційних сумішей було одержано пресовки, що мали пористість 20–22 %. Пресування при тисках, менших за 700 МПа, призводило до одержання пористості в межах 34–36 % і майже повної втрати цілісності брикетів, а при тисках, більших за 900 МПа, відбувалося розшарування пресовок, пов'язане з різницею густини вихідних компонентів шихти.

Після пресування проводилось спікання зразків матеріалів у муфельній печі в середовищі висушеного водню (точка роси становить –40 °C). Дослідження впливу умов спікання проводили в інтервалі температур 800–1200 °C. Зміни деяких властивостей досліджуваного матеріалу залежно від температури спікання наведено на рис. 2.

Отже, було встановлено, що спікання доцільно проводити за температур 1100–1150 °C, які забезпечують одержання максимальної

щільності (після спікання пористість становила 11–13 %) й високого рівня механічних властивостей.

Як видно з рис. 2, еволюція пористої та зеренної структури порошкового матеріалу при спіканні істотно позначається на властивостях матеріалів, і це тим помітніше і впливовіше, чим вище температура спікання.

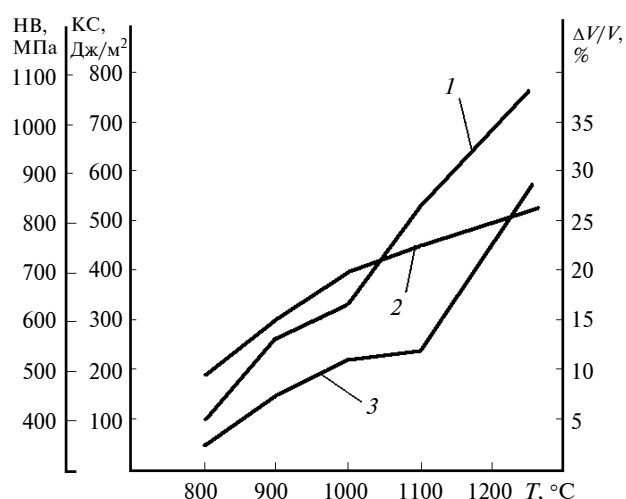


Рис. 2. Залежність властивостей сталі 11P3M3Φ2 + 5 % CaF₂ від температури спікання: 1 – ударна в'язкість; 2 – твердість; 3 – об'ємна усадка

Видно, що із зростанням температури спікання збільшується об'ємна усадка, підвищуються твердість та ударна в'язкість матеріалу, але темп зростання цих характеристик неоднаковий. Це пов'язано з явищем структурної чутливості різних властивостей. Так, за даними [16], найбільшу структурну чутливість мають пластичні властивості матеріалів (також магнітні), далі йдуть міцнісні характеристики – твердість, міцність, модуль пружності і, нарешті, індукція, електропровідність.

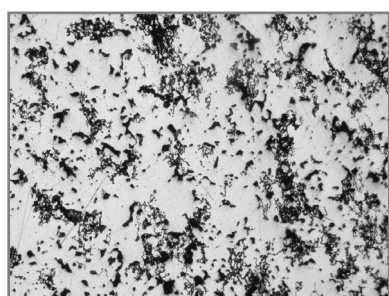
Істотне зростання об'ємної усадки та фізико-механічних властивостей (НВ та КС) починається з температури спікання 900 °C. При нижчих температурах спікання (800–900 °C) об'ємна усадка матеріалу значно нижче (див. рис. 2). Тут усадка значною мірою пов'язана з міжчастинковим переміщенням, і міжчастинкові контакти, що формуються, є ще недостатньо зрілими, містять так звану шовну пористість. Тому і відповідні властивості, а саме міцність (твердість), а особливо пластичність зразків, що спечені при 800–900 °C, надто малі.

Значне зростання об'ємної усадки при 1200 °C для досліджуваного матеріалу, а також підвищення фізико-механічних властивостей побічно свідчать про активацію дифузійних процесів, формування та утворення міжчастинкових контактів, підвищення ступеня легуваності твердих розчинів та фаз, що виникли в процесі спікання.

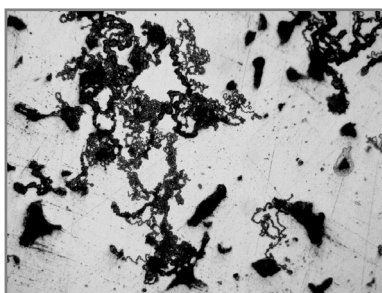
Спікання при температурах вище 1200 °C проводити недоцільно внаслідок початку процесів дисоціації фториду кальцію (повне розкладання сполуки відбувається при 1314 °C [6]).

В результаті розроблених режимів технологічних операцій виготовлення в матеріалі середнього складу 11P3M3Φ2 + 5 % CaF₂ утворилась гетерогенна структура, що складається з металевої матриці та розподілених у ній частинок твердого мастила CaF₂ (рис. 3).

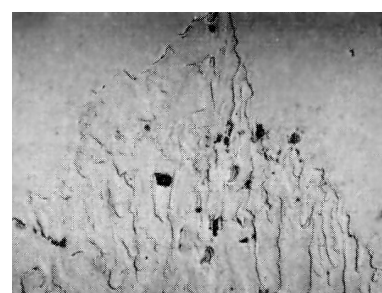
Металева матриця матеріалу 11P3M3Φ2 + 5 % CaF₂ має перлітно-карбідну структуру, що складається з α-твердого розчину та карбідів легувальних елементів (до 40 % об'ємних частинок). У свою чергу, карбідна фаза містить сполуки трьох типів: первинних (евтектоїдних) карбідів, вторинних карбідів, що кристалізуються з аустеніту під час охолодження за підвищених температур і мають вигляд самостійного елемента, і третинних карбідів – найдис-



а



б

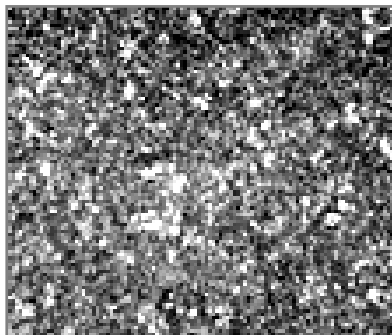


в

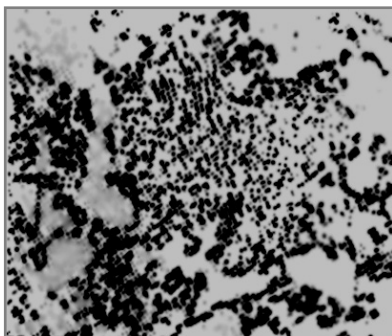
Рис. 3. Мікроструктура матеріалу 11P3M3Φ2 + 5 % CaF₂: а – шліф не травлений, ×100; б – шліф не травлений, ×500; в – растрова електронна мікроскопія, ×7200

персніших, що утворюються протягом повільного охолодження нижче температур перлітного перетворення. Вони становлять основний сорбітний фон структури.

У сталі 11РЗМЗФ2 α -фаза містить до 70 % хрому та невелику частку вольфраму, молібдену та ванадію [5]. Перліт сталі 11РЗМЗФ2 має багато карбідів легувальних елементів, що спричиняє утворення дисперсного перліту із зернистою формою, що видно з рис. 4.



а



б

Рис. 4. Зерниста форма перліту в сталі 11РЗМЗФ2: а – оптична металографія, $\times 500$; б – растрова електронна мікроскопія, $\times 1300$

У перліті сталі 11РЗМЗФ2 міститься 0,2–0,3 % масових частинок вуглецю [5]. Швидко-різальна сталь 11РЗМЗФ2 належить до класу заевтектоїдних ледебуритних сталей, оскільки первинну евтектику в структурі сталі утворює аустеніт. У цьому випадку евтектику називають ледебуритом, незважаючи на те, що замість цементиту вона містить карбіди легувальних елементів, багато з яких не розчинні до температур початку плавлення.

Висновки

В результаті виконаних досліджень розроблено та відпрацьовано технологічну схему виготовлення композиційних підшипникових матеріалів на основі шліфувальних відходів сталі 11РЗМЗФ2 з твердим мастилом CaF_2 , в яку входять такі операції:

- очищення вихідних сталевих відходів від абразивної крихти методом магнітної сепарації;
- відновлювальний відпал при температурах 870–1000 °С в середовищі водню протягом двох годин;
- розмелення утвореного конгломерату на дробильній машині;
- розсіювання порошків за фракціями з відокремленням фракцій 125–160 мкм;
- просушування фториду кальцію протягом однієї години при 120 °С;
- розсіювання порошків CaF_2 за фракціями з відокремленням фракцій до 125 мкм;
- змішування компонентів шихти в банковому змішувачі протягом чотирьох годин;
- пресування брикетів при тиску 700–900 МПа;
- спікання пресовок при температурі 1100–1150 °С в середовищі водню протягом двох годин.

Виконання описаних вище технологічних операцій виготовлення дає можливість отримати складну гетерогенну структуру композиційних підшипникових матеріалів, що забезпечує високий рівень механічних властивостей. Одержана структура складається з сорбітоподібного перліту металевої матриці з рівномірно розподіленими в ній вкрапленнями фториду кальцію.

Подальші дослідження із зазначеного питання будуть спрямовані на встановлення закономірностей формування фазового складу, структурної побудови та властивостей композиційних підшипникових матеріалів на основі відходів легованих сталей з метою одержання можливості спрямованого керування структурою й властивостями шляхом вибору вихідної легованої сировини й твердого мастила.

Т.А. Роик, В.В. Холявко, А.С. Луференко

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОДШИПНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ СТАЛИ 11P3M3Φ2. ЧАСТЬ 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ПОЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА СТРУКТУРУ

Разработана и отлажена технологическая схема изготовления композиционных подшипниковых материалов на основе шлифовочных отходов стали 11P3M3Φ2 с добавками твердого смазочного вещества – фторида кальция. Сформирована сложная (с высоким уровнем механических свойств) гетерогенная структура композиционных подшипниковых материалов, которая складывается из сорбитоподобного перлита металлической матрицы с равномерно распределенными в ней частицами фторида кальция.

T.A. Roik, V.V. Kholiavko, O.S. Luferenko

THE INFLUENCE OF ALLOYING ELEMENTS ON THE FORMATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF COMPOSITE BEARING MATERIALS ON THE BASIS OF STEEL OFFCUTS OF 11P3M3Φ2. PART 1. TECHNOLOGICAL FACTORS OF OBTAINING MATERIALS AND THEIR INFLUENCE ON THE STRUCTURE

The paper develops the technological scheme for obtaining the composition bearing materials on the basis of polishing wastes of steel 11P3M3Φ2 with the solid lubricant CaF_2 . As a result we obtain the complex heterogeneous structure of composition bearing materials with advanced mechanical properties that consists of sorbitlike pearlite metallic matrix with evenly distributed particles of calcium fluoride.

1. Федорченко И.М., Пугина Л.И. Композиционные спеченные антифрикционные материалы. — К.: Наук. думка, 1980. — 404 с.
2. Костецкий Б.И., Носовский И.Г. Износостойкость и антифрикционность деталей машин. — К.: Техніка, 1965. — 206 с.
3. Агеева В.С., Пугина Л.И., Федорченко И.М. и др. Изучение процесса спекания и формирования структуры малопористых материалов на основе железа // Порошк. металлургия. — 1977. — № 6. — С. 85–91.
4. Кравец И.А. Реперативная регенерация трибосистем. — Тернопіль: Вид-во Бережанського агротехнічного ін-ту, 2003. — 284 с.
5. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. — М.: Металлургия, 1983. — 528 с.
6. Роїк Т.А. Спечені композити для високих температур тертя // Вісн. Житомирського інж.-техн. ін-ту. Технічні науки. — 2003. — № 1(24). — С. 37–41.
7. Роїк Т.А. Дослідження та розробка порошкових самозмащуваних матеріалів для високотемпературних вузлів тертя: Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. — К., 1997. — 150 с.
8. Гавриш А.П., Роик Т.А. Новые высокотемпературные подшипниковые материалы на основе отходов инструментальных сталей // Механіка та машинобудування. — 2003. — 2, № 1. — С. 193–198.
9. Шевчук Ю.Ф., Роик Т.А. Порошковые антифрикционные материалы для работы при повышенных температурах // Порошк. металлургия. — 2001. — № 1-2. — С. 53–58.
10. Актуальные проблемы порошковой металлургии / Под ред. О.В. Романа, В.С. Аруначалама. — М.: Металлургия, 1990. — 232 с.
11. Машков А.Д., Успенский Л.Д. Технология производства и применения пористых подшипников. — М.: Машгиз, 1979. — 532 с.
12. Роїк Т.А., Киричок О.П., Гавриш А.П. Композиційні матеріали для підвищених умов експлуатації. — К.: НТУУ "КПІ", 2007. — 404 с.
13. Анциферов В.Н., Акименко В.Б. Спеченные легированные стали. — М.: Металлургия, 1983. — 288 с.
14. Гавриш А.П., Роик Т.А. Влияние технологии получения на свойства порошковых подшипниковых материалов для тяжелых режимов трения // Вест. НТУУ "КПИ". Машиностроение. — 2002. — Вып. 43. — С. 67–71.
15. Гавриш А.П., Роик Т.А. Структура и свойства новых антифрикционных материалов на основе порошковых отходов инструментального производства // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. тр. — Донецк: ДонГТУ. — 2002. — Вып. 20. — С. 75–82.
16. Андриевский Р.А. Порошковое материаловедение. — М.: Металлургия, 1991. — 204 с.